



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Reigo Käis

**SOOJUSTEHNICA KURSUSE LABORATOORNE TÖÖ:
SOOJUSSEADME TÕHUSUS**

**PRACTICAL WORK IN THERMAL ENGINEERING: DEVICE
EFFICIENCY**

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Mart Hovi, *MSc*

lektor Külli Hovi, *MSc*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Reigo Käis		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Soojustehnika kursuse laboratoorne töö: soojusseadme tõhusus			
Lehekülgi: 32	Jooniseid: 7	Tabeleid: 3	Lisasid: 2
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika			
4.17. Energeetikaalased uuringud			
T140 Energeetika			
Juhendaja(d): Mart Hovi, <i>MSc</i> , Külli Hovi, <i>MSc</i>			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021			
<p>Energia on maailmas igapäevaselt asendamatu kohal. Enamus energiaallikaid on taastumatud, seetõttu on väga oluline energiasäästlik tarbimine. Võimalikult suures mahus energia kokkuhoidmiseks arendatakse pidevalt energiatõhusaid seadmeid. Üheks suurimaks takistuseks seadmete 100 protsendilise kasuteguri saavutamiseks on energiakaod. Mida suurem on kasutegur, seda efektiivsemalt seade töötab ning seda vähem energiat läheb kaduma. Kasuteguri maksimaalne väärtus saab olla 100%, kuid eranditeks on soojuspumbad, mille kasutegur on tugevalt üle 100%. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on kirjeldada kasuteguri olemust ning koostada laboratoorse töö juhend soojusseadme kasuteguri määramiseks. Juhend on koostatud Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi Soojustehnika õppeaine tarbeks. Laboratoorse töö juhendi valmimisel viidi selle järgi läbi katse soojusseadme kasuteguri määramiseks. Kasuteguri leidmiseks kasutati soojuspumpa Stiebel Eltron ACP 08 B. Töö praktilises osas läbi viidud katse tulemusena saadud soojuspumba kasutegur on 195,8%. Tulemust võrreldes kirjandusallikatest pärinevate väärtustega, jõuti järeldusele, et leitud kasutegur jääb alla kirjanduses leiduvale.</p>			
Märksõnad: soojendamine, jahutamine, termodünaamika, energia, efektiivsus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Reigo Käis		Curriculum: Engineering	
Title: Practical Work in Thermal Engineering: Device Efficiency			
Pages: 32	Figures: 7	Tables: 3	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research Supervisors: Mart Hovi, <i>MSc</i> , Külli Hovi, <i>MSc</i> Place and date: Tartu, 2021			
<p>Energy is indispensable in the world on a daily basis. Most energy sources are non-renewable, so sustainable energy consumption is very important. It all starts from using energy-efficient devices to save energy as much as possible. One of the biggest obstacles to achieving 100 percent efficiency in equipment is energy loss. The higher the efficiency, the more efficient the device works and the less energy is lost. The maximum efficiency value can be 100%. The aim of this bachelor's thesis is to describe the nature of efficiency and to compile guidelines for laboratory work to determine the efficiency of a heating device. The guide has been compiled for the subject of Thermal Engineering of the Institute of Technology of the Estonian University of Life Sciences. Upon completion of the laboratory work instructions, a test was performed to determine the efficiency of the heating device. The heat pump Stiebel Eltron ACP 08 B was used to find the efficiency. The efficiency of the heat pump obtained as a result of the experiment performed in the practical part of the work is 195,8%. Comparing the result with the values from the literature sources, it was founded that the current heat pump efficiency is quite low.</p>			
Keywords: heating, cooling, thermodynamics, energy, efficiency			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	5
SISSEJUHATUS	6
1. ENERGIATÕHUSUS	7
1.1. Soojendamine	7
1.2. Jahutamine	9
1.3. Energiakaod	10
1.4. Kasutegur	10
2. SOOJUSSEADME TÕHUSUSE MÄÄRAMINE	13
2.1. Meetodid kasuteguri leidmiseks	13
2.2. Katse ettevalmistus	13
2.3. Katse läbiviimine	18
2.4. Laboratoorse töö juhendi koostamine	21
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	22
KOKKUVÕTE	25
KASUTATUD KIRJANDUS	26
SUMMARY	28
LISAD	29
Lisa 1. Laboratoorse töö juhend	30
Lisa 2. Lihtlitsents	32

TÄHISED JA LÜHENDID

c – erisoojus, $\frac{J}{kg \cdot K}$

$E_{kasulik}$ – kasulik saadud energia, J

E_{kogu} – kogu kulutatud energia, J

M – gaasisegu mass, kg

\dot{m} – massikulu, kg/s

p – gaasi rõhk, Pa

Q_2 – soojuspumba poolt tarbitud soojushulk, J

R – gaasisegu gaasikonstant, $\frac{J}{kg \cdot K}$

$S_{ristlõige}$ – külma poole toru ristlõikepindala, m²

T – temperatuur, K

t_1 – algtemperatuur, °C

t_2 – lõpptemperatuur, °C

V – gaasisegu maht, m³

$V_{väljuv}$ – külma õhu poole väljuv õhuvool, m³/s

$v_{väljuv}$ – väljuva külma õhu liikumise kiirus, m/s

Δt – temperatuuride vahe, °C

η – kasutegur, %

μ – gaasisegu moolmass, g/mol

SISSEJUHATUS

Energial on oluline roll kogu elu toimimisel. Energiat tuntakse erinevatel olekul ning puudub toiming, milleks energiat vaja ei lähe. Energiatarbijaid on nii suuremahulisi kui ka väikesemahulisi. Üheks suurimaks energiatarbijaks maailmas loetakse soojendamist ning jahutamist. Antud protsessidega puututakse kokku kõikjal, kuna nende toimine on vajalik nii elusolendite heaoluks kui ka tööstusprotsesside toimimiseks.

Energiat on maailmas piiratud koguses, enamus energiaallikad on taastumatud ning just seetõttu on väga oluline võimalikult suuremahuline energia säästmine. Suur samm energiasäästliku eluviisi kujundamiseks on energiatõhusate seadmete kasutamine. Aastal 2014 seadis Euroopa Liit kliimaeesmärgiks suurendada energiatõhusust aastaks 2030 27% võrra. Selle eesmärgi täitmiseks tahetakse vähendada elektrienergia tarbimist liikmesriikides 1,5% võrra aastas.

Igal seadmel on oma kasutegur, mis näitab, kui tõhus antud seade on. Mida suurem on kasutegur, seda efektiivsemalt seade töötab ning seda väiksem on energiakadu. Kasuteguri väärtus on varieeruv vahemikus 0-100%. Kasutegur ei saa olla üle 100%, kuna seadeldis ei saa välja anda rohkem energiat kui see on tarbinud. Leidub siiski ka mõni erand, mille kohta antakse käesolevas lõputöös lisaselgitusi.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli koostada laboratoorse töö juhend soojusseadme tõhususe kohta. Juhend on koostatud Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi Soojustehnika õppeaine tarbeks. Kuigi antud valdkond on aktuaalne ka laiemas pildis, kuna kasutegur on igal töötaval seadmel. Kirjandusliku osa eesmärgiks on anda ülevaade soojendamise ning jahutamise protsessidest, selgitada lähemalt kasuteguri olemust ning seda mõjutavaid tegureid. Teises peatükis räägitakse soojusseadme tõhususe määramisest - kirjeldatakse läbiviidud katse metoodikat, antakse ülevaade katse ettevalmistusest, katse läbiviimisest ning laboratoorse töö juhendi koostamisest. Kolmandas peatükis antakse edasi katse käigus saadud tulemused ning nende analüüs.

1. ENERGIATÕHUSUS

Kütte-, ventilatsiooni- ja kliimasüsteemid (HVAC- Heating, Ventilation and Air Conditioning) on hoonete peamised energiatarbijad, moodustades ligikaudu 50% hoone energiatarbimisest. Eeldatavasti kasvab järgnevatel aastakümnetel paigaldatud HVAC süsteemide arv tohutult. Peamisteks põhjusteks võib olla suur majanduskasv, globaalne soojenemine ja üldine elatustaseme tõus. Hinnanguliselt kasvab maailmas tänu HVAC süsteemidele elektritarbimine sajandilõpuks 33 korda. Samas positiivse asjaoluna võib välja tuua selle, et on palju tõendeid inimeste tervise ja heaolu kasvule tänu kütte-, ventilatsiooni- ja kliimasüsteemidele. Seetõttu on madala süsinikusisalduse ja tervislikud HVAC süsteemid hädavajalikud ülemaailmse energiakasutuse ja kasvuhoonegaaside vähendamiseks. [1]

1.1. Soojendamine

Soojus on energia, mis siirdub ühelt kehalt teisele temperatuurierinevuse tõttu. Kui kaks erineva temperatuuriga keha viia kokku, siis kandub energia soojemalt kehalt külmemale. Selle tagajärjel soojema keha temperatuur langeb ning külmem keha temperatuur tõuseb, kuni temperatuurid ühtlustuvad. [2]

Soojuseks nimetatakse protsessifunktsiooni, mis on sõltuvuses energiaülekandenähtuse iseloomust. Seega ei saa keha sisaldada soojust kui energiat, vaid keha saab energiat soojusena loovutada või juurde saada. Soojuse juurdesaamis- ja äraandmisprotsessi kirjeldab soojuse siirdamise käsitlemisel termin *soojuskandja*. [3]

Maailmas kogub üha enam populaarsust elektrienergia kasutamine kütteks, nii elamutes, kui ka ühiskondlikes hoonetes. Elektriliseks soojendamiseks nimetatakse protsessi, mille käigus muundatakse elektrienergia soojuseks. Enamlevinud elektriga soojendamise rakendused on ruumi soojendamine, vee soojendamine ning tööstusprotsessid. Olgugi et elektriga kütmine on üldjuhul kulukam teistest kütmissviisidest, siis elektrikütte eest räägivad mitmed eelised. [4]

Elektrilist küttekeha kasutas esimesena aastal 1842 füüsik Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865). Ta oli Tartust pärit Peterburi Teaduste Akadeemia akadeemik. Elekterkütte katseline uurimine algas aga aastal 1907. Sel aastal ehitati Põhja-Itaalias esimesed elektrilised salvestusküttekehad (ahjud). Kuid reaalselt hakati elekterkütet kasutama aastal 1912, kui Seattle'is paigaldati nelja elamusse elekterküte. [3]

Elektriliseks soojendiks nimetatakse seadet, mis muundab elektrienergia soojuseks. See toimub üldjuhul takistite kasutamise abil, mis soojenevad elektrivoolu läbilaskmisel. Takistiteks võivad olla metallsulamist traadid, mittemetalsed süsinikuühendid või vooluringi trükkplaadid. Takistid võivad olla isoleeritud tulekindla materjaliga ning trükkplaadid võivad olla trükitud klaasi sisse. Soojendi puhul võidakse kasutada ka uimekujulisi detaile, mis aitavad soojust paremini laiali hajutada. [5]

Elektrilise soojendamise suurimaks eeliseks võib tuua küttesekskonna puhtuse. Nimelt ei tekita elektriline kütmine erinevaid jäätmeid ning muud kütmisega seonduvat prahti. Tänu sellele ei kulu raha erinevatele koristusteenustele/vahenditele. Arvestades, et elektrilisel kütmisel ei teki suitsugaasi, siis on ka erinevate mürgistuste ning keskkonnasaastuste oht olematu. Elektrilisel kütmisel on võimalik kasutada erinevaid süsteeme temperatuuri reguleerimiseks, mis on kergesti seadistatavad või lausa täielikult automatiseeritud. [6]

Kuid leidub ka mõningaid miinuseid - näiteks elektriküttel peab arvestama sellega, et kütteseade vajab elektritoidet, seega on elektrikaabel vajalik. Kui kasutatav seade on sagedasti ümberpaigutatav, siis võib tekkida probleem elektrivõrku ühendamiseiga. Suuremate ruumide kütmisel võib samuti tekkida probleeme, kuna soojus ei jagune ruumis ühtlaselt. See tingib selle, et kütteseadme läheduses on temperatuur kõrgem ning ruumi kaugemates osades tunduvalt madalam. [7] Elektrikütte kasutamise põhipuuduseks võib lugeda elektrienergia kallidust. [3]

Elekterkütet realiseeritakse nii otse- kui ka salvestusküttena. Otseküte on kasutusel näiteks tavalistes tubastes oludes kasutatavates otseküttekonvektorites ja -radiaatorites. Salvestuskütte kasutusel köetakse küttekeha üles näiteks öösel, kui elektrienergia on odavam. Seejärel salvestub soojus ning seda on võimalik hilisemalt kasutada nii öösel kui ka päeval, ilma, et tekiks vajadus elektrienergiat tarbida. [3]

Ruumide kiirel või lühiajalisel kütmisel leiavad sagedasti kasutamist soojaõhupuhurid. Samuti on väga levinud elektriliste küttekaablite kasutamine. Põhilist kasutust leiavad need

hoonete põrandaküttes, kuid samuti ka selleks, et vältida katuserennide, veevarustustorude ja vihmaveetorude jäätumist. [3]

1.2. Jahutamine

Väga tuntud jahutusviisiks on õhukonditsioneeride kasutamine siseruumides. Selle eesmärgiks on saavutada teatud temperatuur, suhteline niiskus ja õhu puhtus. Üldjuhul kasutatakse õhukonditsioneeride inimeste heaolu tagamiseks. Kuid see leiab laialdaselt rakendust ka tööstuslikult, tagades erinevatele seadmetele korrekse töökeskkonna. Näiteks kui tööstuses tekib erinevate protsesside käigus kõrge temperatuur, siis on konditsioneeride ülesandeks ruumi temperatuuri alandamine. [8]

Õhukonditsioneer peab olema efektiivne sõltumata välistest ilmastikutingimustest ning hõlmama kontrolli järgnevate põhimuutujate üle: õhutemperatuur, õhuniiskus, õhu liikumine ja õhukvaliteet. [8]

Enam kui 100 aastat on möödas esimesest auru kokkusurumisel põhineva elektrilise õhukonditsioneeride leiutamisest. Kuid see on endiselt enim kasutatud tehnoloogia elumajade ning teiste hoonete jahutamisel. Viimasel ajal on välja töötatud palju mitteaurulisel kompressioonil töötavaid jahutusseadmeid, mis töötavad magnetenergilise, termoakustilise ja termoelastsel tehnoloogial. Siiski pole neist ükski leidnud laialdast kasutust. Üheks paljulubavaks jahutustehnoloogiaks on veel termoelektriline jahutamine. Selle tööpõhimõtteks on elektrivoolu toimel soojuse pumpamine seadme ühelt küljelt teisele, baseerudes Peltier'i efektile. Selle meetodi eelisteks on liikuvate osade puudumine, müravabadus ja võimsuse reguleerimine elektrivoolu muutmisega. [9]

Enimkasutatav auru kokkusurumise tehnoloogia koosneb neljast komponendist [10]:

1. Kompressor- madala rõhuga madalatemperatuurilise gaasi rõhu tõstmiseks kõrge rõhuga kõrgetemperatuuriliseks gaasiks.
2. Kondensaator- kõrgrõhuga kõrgtemperatuurilise gaasi muutmine vedelikuks.
3. Paisumisseade- kõrgrõhulise ja kõrgtemperatuurilise külmaaine muutmine madalarõhuliseks ja -temperatuuriliseks küllastunud vedelikuks. See saavutatakse vedeliku juhtimisel läbi ava.

4. Aurusti- soojuse neelamiseks õhust või veest, mis ringleb aurusti soojuvaheti ümber. See muudab ühtlasi madalatemperatuurilise ning -rõhulise küllastunud vedeliku gaasiks.

Need komponendid sisalduvad ühtlasi ka kodumajapidamises leiduvates külmkappides. [10]

1.3. Energiakaod

Kui energia viiakse ühelt olekult teise või ühest süsteemist teise, käivad selle juurde energiakaod. Näiteks energia viimisel ühest vormist teise, läheb osa energiat kaduma puhtalt soojusesse. Samas on praktiliselt võimatu sisendenergia ülekandmine väljundenergiasse ilma soojuslike kadudeta. Kuid elektrilise soojendamise puhul ongi soojuslik kadu soovitud tulemuseks. Energiakaod on suureks takistuseks seadmete 100 protsendilise kasuteguri saavutamiseks. [11]

Soojusenergia kadude vähendamiseks kasutatakse nii tööstustes, kui ka hoonete ehitamisel, laialdaselt soojusisolatsiooni. Soojusisolatsiooni eesmärgiks on vähendada üldist soojusülekandetegurit, mis saavutatakse madala soojusjuhtivusega materjali lisamise teel. Soojusisolatsioon vähendab oluliselt soovimatut soojuskadu. Seeläbi kahaneb kütte- ja ventilatsioonisüsteemide energiavajadus ehk ka majanduslikult vähenevad märgatavalt kütte- ja ventilatsioonikulud. [12]

1.4. Kasutegur

Energiasäästmisel on suur roll seadmete energiatõhususel. Maailmas on energiatehnika areng suuresti suunatud tõhusamate energiatarvitite väljatöötamisele, energiamuundurite kasuteguri suurendamisele ning energia edastuskadude vähendamisele. Näiteks soojuselektrijaamade keskmine kasutegur tõusis 30 protsendilt 40 protsendile aastatel 1970 – kuni 2000. Sama ajavahemiku jooksul on ka Kesk-Euroopas vähendatud hoonete soojusvajadust alates väärtuselt 400 kWh/(m²·a) väärtuseni 50 kWh/(m²·a). [3]

Kasutegurina ehk energiatõhususena mõistetakse kogu energiahulka, mis läheb kasulikuks tööks ning millest pole midagi kaduma läinud, näiteks soojuslikul teel. Üldjoontes

mõõdetakse kasuteguriga, kui palju energiat kasutatakse mingi süsteemi jaoks soovitud jõudluse saavutamiseks. Tänapäeval nimetatakse energiatõhusust isegi energiaallikaks, kuna see on võimeline tooma märkimisväärse energia kokkuhoiu. See omakorda võib asendada elektritootmise primaarallikatest. Teadlased on hakanud energiatõhusust nimetama peidetud kütuseks või nähtamatuks võimsuseks. Samuti on Rahvusvaheline Energiaagentuur (IEA) teatanud, et aastal 2016 oleks maailm võinud kasutada 12% rohkem energiat puhtalt energiatõhususe arvelt, sest teadmisi energiatõhususest on arendatud juba pikemat aega. [13]

Energiatõhusust defineeritakse kui saadud kasuliku energia ning kogu kasutatud energia suhet. [14]

Energiatõhususe arvutamiseks kasutatakse seost [14]

$$\eta = \frac{E_{kasulik}}{E_{kogu}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

kus η on kasutegur %;

$E_{kasulik}$ – kasulik saadud energia J;

E_{kogu} – kogu kulutatud energia J.

Soojuspumba puhul väljendatakse kasutegurit soojuspumba soojustegurina (COP- Coefficient Of Performance). Soojustegur näitab mitu korda rohkem annab seade soojusenergiat võrreldes tarbitud elektrienergiaga. Näiteks, kui soojuspumba soojustegur on 3, siis see toodab soojusenergiat 3 korda rohkem kulutatud elektrienergiast. Pikema perioodi jooksul kasutatakse soojuspumpade tõhususe väljendamisel aastast soojustegurit (SPF- Seasonal Performance Factor). SPF väljendab kogu aasta vältel toodetud soojusenergia suhet kulutatud elektrienergiasse. [15]

Soojuspumba kasuteguri arvutamiseks kasutatakse valemit 1.2. [16]

$$\eta = \frac{Q_2 + P}{P}, \quad (1.2)$$

kus η on soojuspumba kasutegur;

Q_2 – soojuspumba poolt tarbitud soojusenergia J;

P – soojuspumba poolt tarbitud elektrienergia J.

Tabelis 1.1 on välja toodud erinevate seadmete kasutegurid.

Tabel 1.1. Üldkasutatavate seadmete kasutegurid [17,18]

Seade	Kasutegur
Soojuspump	300%
Elektriline soojendi	100%
Föön	100%
Elektrigeneraator	95%
Elektrimootor (suur)	90%
Aku	90%
Aurukatel	85%
Kodune gaasiahi	85%
Elektrimootor (väike)	65%
Auruturbiin	45%
Automootor	25%
Luminofoorlamp	20%

Kui varasemalt on välja toodud, et kasutegur ei saa olla üle 100%, siis suureks erandiks on soojuspumbad. Soojuspumpade kõrge kasutegur on tingitud sellest, et soojuspump kasutab lisaks elektrienergiale ka suures osas soojusenergiat keskkonnast. Seda energiat, mis tuleneb keskkonnast, loetakse samuti kasulikuks energiaks.

2. SOOJUSSEADME TÕHUSUSE MÄÄRAMINE

2.1. Meetodid kasuteguri leidmiseks

Kõik soojusseadmed on üles ehitatud võimalikult efektiivselt töötama. Kuid siiski leidub erinevaid kadusid, mis vähendavad seadme tõhusust. Selleks, et leida, kui efektiivne mõni seade on, tuleb leida selle kasutegur. Kasuteguri leidmiseks on kaks erinevat võimalust: kaudne mõõtmine ja otsene mõõtmine.

Kasuteguri määramist kaudsel meetodil kasutatakse enamasti ahjude ja katelde puhul, kus on tarbitud ning saadud energiahulga leidmine raskendatud. Kaudse meetodi puhul arvutatakse kasutegur läbi soojuskadude.

Otsest meetodit kasutatakse, siis kui on võimalik määrata tarvitatud ja saadud energiahulk. Näiteks elektriliste seadmete korral kasutatakse enamasti otsest kasuteguri arvutamise meetodit.

2.2. Katse ettevalmistus

Esmalt valiti meetod, mille abil leitakse soojusseadme kasutegur. Seejärel valiti tulemuste arvutamiseks sobivad valemid ning seade, mille kasutegurit leidma hakatakse. Autori poolt osutus valituks mobiilne soojuspump Stiebel Eltron ACP 08 B (joonis 2.1). Antud soojusseadme parameetrid on koondatud tabelisse 2.1.

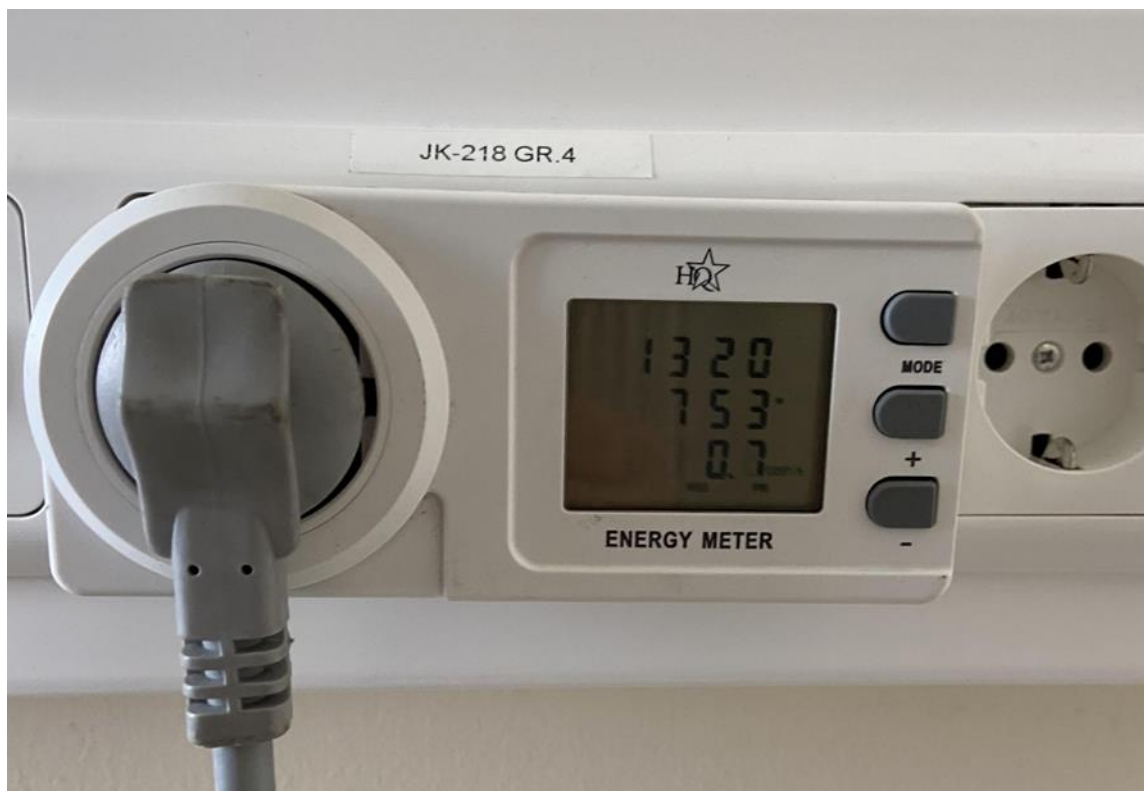


Joonis 2.1. Stiebel Eltron ACP 08 B.

Tabel 2.1. Stiebel Eltron ACP 08 B tehnilised andmed

Parameeter	Väärtus
Toitepinge	220-240 V
Sagedus	50 Hz
Kaitseklass	IP10
Jahutusvõimsus	2,0 kW
Nimivõimsus	1,075 kW
Nimivool	4,9 A
Käivitusvool	23 A
Nimiõhuvool	350 m ³ /h
Maksimaalne töö rõhk	35 bar

Soojuspump ühendati elektrivõrku, energiakulu mõõtmiseks lisati energiakulu arvesti (joonis 2.2). Energiakulu arvesti on lihtsasti paigaldatav ning kasutatav mõõtevahend elektriseadme energiakulu mõõtmiseks. Antud seadmega on võimalik mõõta hetkest energiakulu, kui ka pikema perioodi jooksul tarbitud elektrienergiat. Samuti näitab arvesti, milline on elektritarviti võimsustegur $\cos \varphi$.



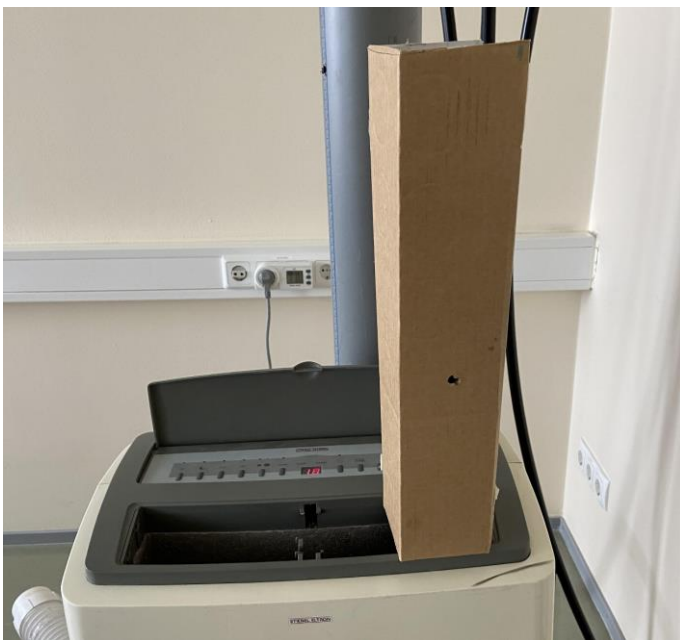
Joonis 2.2. Energiakulu arvesti

Arvestades, et külma õhu väljumisel soojuspumbast liigutab õhku tsentrifugaalventilaator, mis tõmbab kohati ka õhku seadmesse sisse. Seetõttu tuli katta väljuva õhu ava osaliselt kinni. Selleks kasutati antud juhul vihkut, mis täitis oma eesmärgi. Avatuks jäi vaid ruudukujuline ava ühte otsa, kust külm õhk väljus kõige intensiivsemalt (joonis 2.3).



Joonis 2.3. Katseseade koos toruga.

Selle ava kohale valmistati papist kokkuvolditud ruudukujuline toru (joonis 2.4). Toru keskele, ühele küljele, tehti väike auk, kust mõõta anemomeetri abil õhu liikumise kiirust ning temperatuuri. Mõõtmine toimub toru keskelt just seetõttu, et voo mõõtmisel on soovitatav jätta mõõteseadme ees ning järel sirge osa. See tagab täpsema mõõtmise jaoks vajaliku õhuvoo stabiilsuse.



Joonis 2.4. Katseseadme külgvaade.

Anemomeetri abil mõõdeti samuti soojuspumpa siseneva õhu temperatuur. Tegelikult vastab see ruumitemperatuurile, kuid antud juhul oli võimalik seda hõlpsasti mõõta läbi siseneva õhuava külge modifitseeritud toru (joonis 2.5).



Joonis 2.5. Siseneva õhu temperatuuri mõõtmine.

Seejärel olid katseseadet ettevalmistavad protsessid lõpetatud ning alustati katse läbiviimist.

2.3. Katse läbiviimine

Katse ülesehituse käigus katsetati iga parameetri mõõtmisel erinevaid mõõteriistu ning lõpuks valiti välja sobivaimad ning mugavamalt käsitletavad antud olukorra tarbeks.

Kasuteguri arvutamiseks mõõdeti seadmega Testo 405i (joonis 2.6) ruumi temperatuuri, soojuspumbast väljuva õhu temperatuuri ja liikumise kiirust ning energiakulu arvestiga soojuspumba poolt tarbitud elektrienergiat. Enne mõõtmist tutvuti seadme tehniliste andmetega (tabel 2.1), et vältida seadme vale käitlemist. Antud mõõteriist tugineb kuuma traadi põhimõttel.

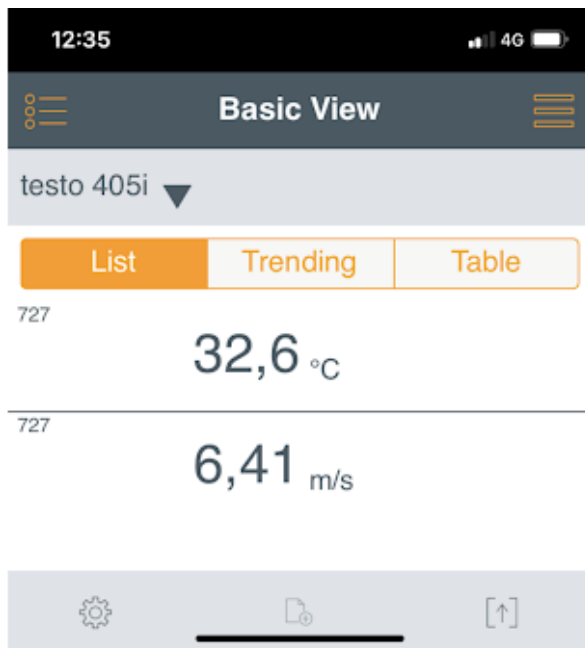


Joonis 2.6. Anemomeeter Testo 405i.

Tabel 2.1. Testo 405i tehnilised andmed [19]

Parameeter	Mõõtepiirkond	Täpsus	Tulemuse esitus
Temperatuur	-20 °C – 60 °C	±0,5%	0,1 °C
Kiirus	0 – 30 m/s	±0,1 m/s + 5 % (0 – 2 m/s) ±0,3 m/s + 5 % (2 – 15 m/s)	0,01 m/s

Testo 405i võimaldab tulemusi kuvada nutitefonis (joonis 2.7). Selleks tuleb telefoni alla laadida Testo Smart Probes rakendus ning luua ühendus Bluetoothi abil telefoni ja seadme vahel. Seejärel on võimalik mõõtetulemusi vaadata nutitefonist, võimaldades luua mõõtetulemuste põhjal ka Microsoft Exceli tabeli ning graafiku.



Joonis 2.7. Kuvatõmmis Smart Probes rakendusest.

Kõik saadud mõõtetulemused kanti laboris töölehele. Arvutuste jaoks olid eelnevalt valitud sobivad valemid.

Selleks, et leida külma õhu poolel ruudukujulise õhuava pindala on kasutatud valemit 2.1, väljuva külma õhu voolu arvutamiseks on kasutatud valemit 2.2, massikulu on leitud valemiga 2.4 ja külma õhu poolelt eraldunud soojusenergia avaldatakse valemiga 2.6. Seejärel saadud tulemused pandi soojuspumba kasuteguri valemisse 1.2 ning arvutati kasutegur.

$$S_{ristlõige} = a^2, \quad (2.1.)$$

kus $S_{ristlõige}$ on külma poole toru ristlõikepindala m^2 ;

a – ava küljepikkus m.

$$V_{väljuv} = v_{väljuv} \cdot S_{ristlõige}, \quad (2.2.)$$

kus $V_{väljuv}$ on külma poole väljuv õhuvool m^3/s ;

$v_{väljuv}$ – väljuva külma õhu liikumise kiirus m/s;

$S_{ristlõige}$ – toru ristlõikepindala m^2 .

Massikulu valemi tuletamiseks on vaja teada ideaalgaasi olekuvõrrandit (Clapeyroni võrrand), mis on toodud välja valemina 2.3. [20]

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot T, \quad (2.3.)$$

kus p on gaasi rõhk Pa;

V – gaasisegu maht m^3 ;

M – gaasisegu mass kg;

R – gaasisegu gaasikonstant $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;

T – temperatuur K.

Sellest seosest avaldub gaasisegu mass M järgnevalt (valem 2.4):

$$M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}. \quad (2.4.)$$

Gaasikonstant R avaldatakse valemiga 2.5 [20]

$$R = \frac{8314}{\mu}, \quad (2.5.)$$

kus μ on gaasisegu moolmass g/mol.

Soojuspumba külmal poolel eraldunud soojushulk arvutatakse valemiga 2.6.

$$Q_2 = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t, \quad (2.6.)$$

kus Q_2 on soojuspumba külmal poolel eraldunud soojushulk J;

\dot{m} – massikulu kg/s;

c – erisoojus $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;

Δt – temperatuuride vahe $^{\circ}\text{C}$.

Temperatuuride vahe Δt arvutatakse valemiga 2.7.

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (2.7.)$$

kus t_2 on lõpptemperatuur °C;

t_1 – algtemperatuur °C.

Viimaseks arvutatakse soojuspumba kasutegur valemiga 1.2.

$$\eta = \frac{Q_2 + P}{P}, \quad (1.2.)$$

kus η on soojuspumba kasutegur;

Q_2 – soojuspumba poolt tarbitud soojusenergia J;

P – soojuspumba poolt tarbitud elektrienergia W.

2.4. Laboratoorse töö juhendi koostamine

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli koostada laboratoorne töö. Selle eesmärgi täitmiseks tuli välja mõelda labortöö juhend, mis väljendaks selgesti töö eesmärki, teoreetilist osa, ning töö käiku.

Juhendi koostamisel lähtuti ka sellest, et töö oleks teostatav kahe akadeemilise tunni jooksul. Sealjuures on arvestatud juhendiga tutvumiseks ja katse läbiviimiseks 45 minutit ning hilisemaks tulemuste analüüsiks samuti 45 minutit. Samuti peeti silmas seda, et juhend jätaks üliõpilastele pisut mõtlemisruumi, kuna tegemist on tehnilise erialaga, kus alati kõik polegi täpselt üks-ühele mõistetav. Seepärast selgitati lühidalt kasuteguri olemust ning anti ette valem selle arvutamiseks. Ülejäänud vajalikud valemid tuleb üliõpilasel endil leida. Samuti näeb juhend ette tulemuste kriitilist analüüsi, mis peaks arendama tudengi mõtlemis- ja analüüsivõimet.

Juhendi koostamisel peeti silmas samuti ka seda, et juhend oleks niiõelda universaalselt kasutatav. Selle olulisus peitub selles, et nii on võimalik töö läbi viia erinevate seadmetega. Näiteks distantsõppe ajal on olulisel kohal asjaolu, et töö oleks teostatav koduste vahenditega.

3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

Kasuteguri leidmiseks kasutati soojuspumpa Stiebel Eltron ACP 08 B. Katse viidi läbi Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi soojustehnika laboris. Katse mõõtmised teostati soojusseadme külmal poolel.

Alljärgnevalt on välja toodud katsetulemused.

$$v_{välja} = 7,2 \text{ m/s}$$

$$t_{sisse} = 25,2 \text{ °C}$$

$$t_{välja} = 12,6 \text{ °C}$$

$$P = 753 \text{ W}$$

Samuti mõõdeti ära ruudukujulise õhuava küljepikkus a , et arvutada ava ristlõikepindala.

$$a = 0,08 \text{ m}$$

$$S_{ristlõige} = a^2 = 0,08^2 = 0,0064 \text{ m}^2$$

Selleks, et teada, kui palju õhku liigub läbi toru ühes sekundis, tuleb arvutada õhuvool V , kasutades valemit 2.2.

$$V = v_{väljav} \cdot S_{ristlõige} = 7,2 \cdot 0,0064 = 0,04608 \text{ m}^3/\text{s}$$

Õhu massikulu arvutamiseks on leitud kirjandusest atmosfääri normaalõhurõhk p . [21]

$$p = 101325 \text{ Pa}$$

Õhu gaasikonstandi arvutamiseks tuleb teada kuiva õhu molaarmassi μ . [22]

$$\mu = 28,96 \text{ g/mol},$$

Gaasikonstandi R arvutamiseks on kasutatud valemit 2.5.

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{28,96} = 287,1 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Selleks, et teada, kui palju õhku kilogrammides läbib toru ühes sekundis, arvutatakse massikulu \dot{m} , kasutades valemit 2.4.

$$\dot{m} = \frac{pV}{RT} = \frac{101325 \cdot 0,04608}{287,1 \cdot (12,6 + 273,15)} = 0,05691 \frac{kg}{s}$$

Järgnevalt leitakse soojuspumba poolt tarbitud soojushulk. Selle avaldamiseks kasutatakse valemit 2.6. Selleks tuleb esmalt leida õhu erisoojus c . Kuna tegemist on isobaarse protsessiga, sest kogu protsessi jooksul jääb rõhk muutumatuks, siis leitakse õhu erisoojus isobaarsel protsessil. Erisoojuse leidmisel on valitud tabelist lähim temperatuur vastavalt katsele, milleks on 15,6 °C.

$$c = 1,006 \frac{kJ}{kg \cdot K} [23]$$

$$Q_2 = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t = 0,05691 \cdot 1,006 \cdot (25,2 - 12,6) = 0,7214 \frac{kJ}{s} = 0,7214 kW$$

$$= 721,4 W$$

Kui soojuspumbast saadud soojusenergia on avaldatud, siis arvutatakse välja soojusseadme kasutegur, kasutades valemit 1.2.

$$\eta = \frac{Q_2 + P}{P} = \frac{753 + 721,4}{753} = 1,958$$

Lõpuks avaldatakse soojusseadme tõhusus protsentides.

$$\eta = 1,958 \cdot 100\% = 195,8\%$$

Tulemusena saadi soojuspumba Stiebel Eltron ACP 08 B kasuteguriks 195,8%. Mis teeb soojuspumba efektiivsusnäitajaks (COP) antud juhul 1,958. Arvestades asjaolu, et tegemist on üsna vana seadmega, siis on tulemus rahuldav. Kuid kaasaegsematel soojuspumpadel küündib kasutegur ligikaudu 2 korda kõrgemale. Ka käesoleva töö kirjanduslikus osas välja toodud tabelis 1.1, on märgitud soojuspumba kasuteguriks 300%. Kindlasti võib tõdeda, et

töös käsitletud soojuspumba arvatatud kasutegur muutub iga mõõtmisega kuigivõrd. Kuid siiski jääb see ilmselt alla kirjanduses märgitule.

Soojusseadme kasuteguri leidmisel on oluline roll mõõtmistel. Antud töös osutus suureks proovikiviks õhu liikumise kiiruse mõõtmine, mis mõjutas omakorda tulemust üsna palju. Kinnitatud sai ka asjaolu, et toru äärtes on õhu liikumise kiirus aeglasem ning keskel on see kõige suurem. Igal järgneval mõõtmisel saadud tulemus erines eelmisest, mitte küll oluliselt, kuid siiski. Samamoodi oli ka õhutemperatuuri mõõtmisega. Kuid arvestades, et tegemist on laboratoorse tööga, mida töötavad läbi paljud tehnilise taibuga üliõpilased, siis see on isegi positiivne asjaolu. Nii nähakse, et kõik tulemused ei olegi alati ühesugused ning õpitakse paremini analüüsima, millest tulenevad erinevused.

Kokkuvõtvalt võib tõdeda, et läbiviidud katse täitis oma eesmärgi.

KOKKUVÕTE

Energial on igapäevaelus tähtis roll. Selleks, et tööstused ja kaubandused toimiksid, ühiskonna jõukus tõuseks ning inimeste mugavus ja liikuvus oleks tagatud, on vajalik energia olemasolu. Üheks suurimaks energiatarbijaks peetakse soojendamist ja jahutamist. Antud protsessid on vajalikud nii elusolendite heaoluks kui ka tööstusprotsesside toimimiseks seega nendega puututakse kõikjal kokku. Energiat on maailmas piiratud koguses, kuna enamus energiaallikad on taastumatud, siis tuleb kasutada säästlike lahendusi. Igal seadmel on olemas oma kasutegur, mis näitab seadme tõhusust. Mida suurem on kasutegur, seda efektiivsemalt seade töötab ning seda vähem energiat läheb kaduma. Kasuteguri maksimaalne väärtus on 100%. Kuid nagu tuli töös välja, siis soojuspumpade kasutegurid on üle 100%, kuna need suudavad lisaks elektrienergiale kasutada ka kasulikku energiat keskkonnast.

Bakalaureusetöös koostati laboratoorse töö juhend kasutegurist Soojustehnika õppeaine tarbeks. Antud laboratoorse töö eesmärgiks oli aidata kaasa õppeaine, kui ka õppekava õpiväljundite täitmisele. Tugevalt käsitletud teemadeks olid termodünaamilised protsessid ning energia muundumine. Samuti võimaldab laboratoorne töö arendada üliõpilase soojustehnilist projekteerimisvõimet läbi katseseadme ettevalmistuse ning käitlemise. Juhendi koostamiseks uuriti esmalt soojendamise ja jahutamise enimkasutatavaid viise ning nende olemust. Toodi välja kasuteguri definitsioon, selgitati kasuteguri olemust ning analüüsiti kasutegurit enim mõjutavat tegurit- energiakadu. Nimelt on energiakaod üheks suurimaks takistuseks seadmete 100 protsendilise kasuteguri saavutamiseks. Laboratoorse töö juhendi valmimisel viidi selle järgi läbi katse soojusseadme kasuteguri määramiseks. Antud juhul kasutati soojusseadmena Stiebel Eltron ACP 08 B soojuspumpa.

Katsest saadud tulemuste põhjal arvutati välja töös käsitletava soojuspumba kasutegur, milleks oli 195,8%. Tulemust võrreldi kirjandusallikatest pärinevate väärtustega, mille käigus jõuti järeldusele, et leitud kasutegur jääb pisut alla tänapäevastele efektiivsetele soojuspumpadele.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Zhenjun, M., Haoshan, R., Wenye, L.** (2019). A review of heating, ventilation and air conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy Solar Decathlon houses. *Journal of Cleaner Production*. [veebileht] <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118158> (20.04.21)
2. Encyclopedia Britannica. (s.a.) Heat. [veebileht] <https://www.britannica.com/science/heat> (22.04.21)
3. **Risthein, E.** (2013). Energiatehnika ja maailm. Tallinn: TTÜ kirjastus. 436 lk.
4. **Kubba, S.** (2016). Chapter Nine – Impact of Energy and Atmosphere. *Handbook of Green Building Design and Construction (Second Edition)*. [veebileht] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810433-0.00009-5> (27.04.21)
5. Encyclopedia Britannica. (s.a.) Electric heater. [veebileht] <https://global.britannica.com/technology/electric-heater> (01.04.21)
6. Engineering Notes. (s.a.) Electric Heating: Methods and Advantages. Electrical Engineering. [veebileht] <https://www.engineeringenotes.com/electrical-engineering/electric-heating/electric-heating-methods-and-advantages-electrical-engineering/36410> (01.04.21)
7. Lahaaland. (s.a.) Electric Heaters – Advantages and Disadvantages. [veebileht] <https://lahaaland.com/electric-heaters-advantages-and-disadvantages/> (28.04.21)
8. Carel. (s.a.) What's air-conditioning? [veebileht] <https://www.carel.com/what-s-air-conditioning-> (18.05.21)
9. **Saini, A., Watzman, S.J., Bahk, Je-H.** (2021). Cost-Performance Trade-off in thermoelectric air conditioning system with graded and constant material properties. *Energy and Buildings*. [veebileht] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110931> (14.04.21)
10. Space Air. (s.a.) Vapour Compression Cycle. [veebileht] <https://www.spaceair.co.uk/what-is-air-conditioning/vapour-compression-cycle> (14.04.2021)
11. Energy Education. (2020). Energy loss. [veebileht] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_loss (04.04.21)
12. Thermal Engineering. (2019). What is heat loss – Definition. [veebileht] <https://www.thermal-engineering.org/what-is-heat-loss-definition/> (20.04.21)
13. **Islam, M.M., Hasanuzzaman, M.** (2020). Intruduction to energy and sustainable development. *Energy for Sustainable Development*. 310 lk. [on-line] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814645-3.00001-8> (04.04.21)

14. Rapid Tables. (s.a.) Electric power efficiency. [veebileht]
<https://www.rapidtables.com/electric/efficiency.html> (04.04.21)
15. Kliimaseade. (s.a.) Soojuspumba soojustegur (COP) ja sesoonne soojustegur (SCOP).
<https://www.kliimaseade.ee/abiks-alla/espl/soojuspumba-soojustegur/> [veebileht] (14.05.21)
16. **Nyers. J.M., Nyers Á.J.** (2011). COP of heating-cooling system with heat pump. *2011 IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES)*. [on-line]
<http://dx.doi.org/10.1109/EXPRES.2011.5741809> (25.05.21)
17. Efficiency of energy conversion [e-ajakiri] <https://personal.ems.psu.edu/~radovic/Chapter4.pdf>
 (18.05.21)
18. Leonardo Energy. (2021). How efficient is a heat pump? [veebileht] <https://help.leonardo-energy.org/hc/en-us/articles/203047881-How-efficient-is-a-heat-pump-> (22.05.21)
19. Testo. (2021). Testo 405i - Hot-wire anemometer wireless Smart Probe.
<https://www.testo.com/en-US/testo-405i/p/0560-1405> [veebileht] (16.05.21)
20. **I. Mikk.** (1977). Soojustehnika käsiraamat. Tallinn: Valgus. 620 lk.
21. Britannica. (s.a.) Atmospheric pressure. [veebileht]
<https://www.britannica.com/science/atmospheric-pressure> (19.05.21)
22. Engineering toolbox. (2004). Air - Molecular Weight and Composition. [veebileht]
https://www.engineeringtoolbox.com/molecular-mass-air-d_679.html (19.05.21)
23. Engineering toolbox. (2004). Air - Specific Heat at Constant Pressure and Varying Temperature.
 [veebileht] https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html
 (19.05.21)

SUMMARY

Energy have an important role in everyday life. Energy is essential for industry and trade function, the prosperity of society increase and for people's comfort and mobility. Heating and cooling are considered to be one of the largest energy consumers. These processes are necessary for the well-being of living things as well as for the functioning of industrial processes, so they are encountered everywhere. There is a limited amount of energy in the world, as most energy sources are non-renewable, there is huge need for using sustainable solutions. Each device has its own efficiency, which shows the efficiency of the device. The higher the efficiency is, the more efficiently the device works and the less energy gets lost. The maximum efficiency value is 100%. Exceptions are heat pumps with an efficiency about 300%.

In Bachelor's thesis has been compiled a guide to laboratory work of the efficiency for subject of Thermal Engineering. In order to compile the guide, were first studied heating and cooling most commonly used methods and their nature. The definition of efficiency was given, the nature of efficiency was explained and the factor most influencing efficiency - energy loss - was analyzed. Energy losses are one of the biggest obstacles to achieving 100 percent efficiency in equipment. When the laboratory work manual was completed, a test was performed to determine the efficiency of the heating device. The heat pump Stiebel Eltron ACP 08 B was used to find the efficiency.

Based on the results of the work, the efficiency of the heat pump in question was calculated to be 195,8%. The result was compared with values from literature sources, during which it was concluded that the found efficiency is quite different depending on the age of the heat pump.

LISAD

Lisa 1. Laboratoorse töö juhend

Soojusseadme kasuteguri määramine

Laboratoorne töö

TÖÖ EESMÄRK

Töö eesmärgiks on määrata soojusseadme kasutegur ning hinnata saadud tulemust, läbi mille omandada soojustehnika õppeaine õpiväljundid. Laboratoorse töö läbinud üliõpilasel peaks kujunema arusaam energiamuundumisest ning termodünaamilistest protsessidest.

TEOORIA

Kasutegur väljendab kasuliku saadud energia ja kogu kulutatud energia suhet. Kasutegur ei saa olla suurem kui 1 (100%).

VALEM

$$\eta = \frac{E_{kasulik}}{E_{kogu}} \cdot 100\%,$$

kus η on kasutegur %;

$E_{kasulik}$ – kasulik saadud energia J;

E_{kogu} – kogu kulutatud energia J.

TÖÖVAHENDID

Soojusseade, anemomeeter Testo 405i, abivahend õhu liikumise kiiruse mõõtmiseks (toru), energiakulu arvesti, multimeeter.

TÖÖ KÄIK

1. Ühendada elektrivõrku katseseade. Energiakulu mõõtmiseks lisada energiakulu arvesti.

2. Arvutada katseseadmesse sisenev õhuvool, kasutades seadmesse siseneva õhuava pindala. Õhu liikumise kiiruse mõõtmiseks kasutada anemomeetrit Testo 450i. Seade näitab ära ka edasiselt vajamineva siseneva õhu temperatuuri. Täpsema õhu liikumise kiiruse mõõtmiseks kasutada toru, mis paigaldada katseseadmesse siseneva õhu ava külge. Jälgida tuleks, et ühendus oleks õhukindel.
3. Leida õhu massikulu kasutades ideaalse gaasi olekuvõrrandit.
4. Arvutada läbi massikulu saadud soojusliku energia hulk. Kuna väljuva õhu temperatuur võib ületada anemomeetri Testo 405i mõõtepiirkonna, siis leida alternatiivne mõõteseade (nt. temperatuuri mõõtmise võimekusega multimeeter).
5. Avaldada kasutegur.
6. Kriitiliselt analüüsida saadud tulemusi ning vormistada laboratoorse töö aruanne tuginedes EMÜ lõputööde vormistamise juhendile. Aruandesse lisada katset iseloomustavaid pilte.

Lisa 2. Lihtlitsents

Mina, Reigo Käis,

sünniaeg 11.08.1999,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „Soojustehnika kursuse laboratoorne töö: soojusseadme tõhusus“, mille juhendaja(d) on Mart Hovi, *MSc*, Külli Hovi, *MSc*
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Reigo Käis

/allkirjastatud digitaalselt/

Tartu, 28.05.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Mart Hovi

28.05.2021

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

/allkirjastatud digitaalselt/

Külli Hovi

28.05.2021

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

/allkirjastatud digitaalselt/